烧结

烧结矿竖式冷却炉气固传热影响因素研究

王为术[1]，甄 娟[1,2]，郭嘉伟[1]，彭 岩[3]，王 磊[4]，尚梦源[1]
(1. 华北水利水电大学 电力学院，河南 郑州 450045；2. 中建环能科技股份有限公司，四川 成都 610045；
3. 中信重工机械股份有限公司 河南 洛阳 471039；4. 大唐中南电力试验研究院 河南 郑州 450016)

摘要： 为探究高温烧结矿竖式冷却炉气固逆流冷却换热规律，文章基于欧拉模型和局部非热力学平衡理论，改变单一参数对烧结矿冷却炉换热过程进行研究，并构建㶲效率模型对不同参数变化下竖式冷却炉内传热效果进行评价。研究表明：冷却炉内同一高度下烧结矿温度沿径向整体均呈“M”型分布，冷却风压力沿径向均呈中间高两侧低的“驼峰”型分布，冷却风速沿径向均呈中间高两侧低的“双驼峰”型分布；在炉内换热过程中，当增大气固比、提升冷却段高度、扩大冷却段直径时，冷却效果增强，㶲效率减小，而扩大冷却段直径时，冷却效果降低，㶲效率增大；当增大气固比、提高进口风温、提升冷却段高度时，料层阻力损失增加，而扩大冷却段直径时，料层阻力损失减小。研究结果可为后续确定冷却炉最佳参数提供理论基础。

关键词： 气固传热；烧结矿；竖式冷却；余热回收；㶲效率模型；数值模拟
中图分类号： TF046.4；TK115 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)05－0033－010
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.05.068

Research on influencing factors of gas-solid heat transfer in sinter vertical cooling furnace

WANG Weishu[1], ZHEN Juan[1,2], Guo Jiawei[1], PENG Yan[3], WANG Lei[4], SHANG Mengyuan[1]
(1. Faculty of Electricity, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, Henan, China; 2. CSCEC SCIMEE Sci. & Tech. Co., Ltd., Chengdu 610045, Sichuan, China; 3. CITIC HIC, Luoyang 471039, Henan, China; 4. Datang Zhongnan Electric Power Testing and Research Institute, Zhengzhou 450016, Henan, China)

Abstract: In order to explore the cooling heat transfer law of gas-solid countercurrent of high-temperature sinter vertical cooling furnace, based on the Eulerian model and local non-thermodynamic equilibrium theory, a single parameter is changed to study the heat transfer process of sinter cooling furnace, and an energy efficiency model is constructed to evaluate the heat transfer effect in the vertical cooling furnace under different parameter changes. The results show that the sinter temperature in the cooling furnace is distributed in an “M” type along the radial direction, the cooling air pressure is distributed in a “Camelbak” type along the radial direction, and the cooling wind speed is distributed in a “Double Camelbak” type with high in the middle and low on both sides along the radial direction. In the process of heat exchange in the furnace, when the gas-solid ratio is increased, the height of the cooling section is increased, and the diameter of the cooling section is expanded, the cooling effect is enhanced, and the energy efficiency is reduced. When the diameter of the cooling section is expanded, the cooling effect is reduced and the energy efficiency is increased. When the gas-solid ratio, the inlet air temperature, and the height of the cooling section are increased, the resistance loss of the bed of material is increased, while when the diameter of the cooling section is expanded, the resistance loss of the bed of material is

收稿日期： 2022－05－17；**修回日期：** 2022－08－08
基金项目： 中原科技创新领军人才项目(224200510022)；国家重点研发计划资助项目(2016YFB0601404)
作者简介： 王为术(1972—)，男，教授，博士，从事多相流体热质传递、流体动力输送安全、工业深度节能环保、储能系统安全管理和污染物控制等方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

decreased. The results can provide a theoretical basis for determining the optimal parameters of the cooling furnace in the future.

Key words: gas-solid heat transfer; sinter; vertical cooling; waste heat recovery; energy efficiency model; numerical simulation

钢铁行业作为国家的重要基础产业，具有长流程高耗能的特点，但能源利用率仅为30%~50%。烧结工程为其第三大耗能工序，余热回收率仅为22%，超过70%的余热未被利用。因此烧结余热的高效回收利用，对钢铁行业节能降耗，提质增效具有重要的现实意义[1]。传统的冷却方式为环冷或带冷方式，存在密闭性差、烧结矿冷却不均匀、余热回收率低等问题[2]。基于干法熄焦技术形成的竖炉冷却技术，具有漏风率低、余热回收率高等特点[2]。

烧结矿竖式冷却炉内的气体流动及气固传热问题是影响竖式冷却炉余热回收的重点问题。FENG团队建立了环冷机内非稳态气固传热模型，分析了不同参数对环冷机余热回收的影响[3]；冯军胜等[4]基于多孔介质模型，结合气固填料床动力学理论建立了烧结竖罐内气体流动的数学模型；FENG等[5]根据实验数据的回归分析，得到修正后的Ergun关联式和气固传热关联式；冯军胜等[6-7]通过建立气固传热实验装置，研究了烧结矿气固传热特性，并将试验和数值模拟结合研究了烧结矿余热回收竖罐内气固传热过程的基本规律。TIAN等[8-9]建立了环冷机内三维流动和传热的数值计算模型，优化分析了环冷机的运行参数，同时建立了以余热回收㶲量为目标函数的模型。TIAN等[10]、FAN等[11]研究了竖式冷却炉内的壁面效应对阻力系数的影响，并提出了混合粒度烧结矿填充床阻力预测公式。为准确分析不同粒径填充床内气体阻力，许多学者从壁面效应[12-13]、颗粒形状[14]和粒径分布[15-16]等角度修正了Ergun方程。基于㶲概念对传热过程进行分析，SOMA[17]和DUNBAR等[18]最早提出了㶲传递的概念。

借鉴干熄焦技术形成的竖炉冷却工艺在余热回收率方面有极大提高，但焦炭与烧结矿物性大不相同，需结合烧结矿物性参数对冷却过程进行研究分析。为掌握竖式烧结矿冷却炉内气固逆流换热规律，开发竖炉冷却气固流场协同匹配关键技术，实现高温烧结矿炉内连续、稳定、高效冷却。文章模拟研究冷却炉结构参数和运行参数对竖式烧结矿炉系统气固逆流换热的影响规律，揭示高温烧结矿料冷却换热规律，以期为后续确定竖式冷却炉最佳参数提供理论基础。

1 竖式冷却炉模型建立

1.1 数学模型

(1) 连续性方程。

$$u\frac{\partial(\varepsilon\rho_f u)}{\partial x}+\nu\frac{\partial(\varepsilon\rho_f v)}{\partial y}+w\frac{\partial(\varepsilon\rho_f w)}{\partial z}=0 \quad (1)$$

式中：ε为矿料孔隙率，%；ρ_f为空气密度，kg/m^3；u、v、w分别为空气在x、y、z方向上的分速度，m/s。

(2) 运动方程。

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j)=\left[\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)-\frac{\partial P}{\partial x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\mu\frac{\partial u_j}{\partial x_j}\right)\right]+g_i-f_i+S_i \quad (2)$$

式中：x_i、x_j为笛卡尔坐标系中的空间坐标；u_i、u_j为表观速度，m/s；μ为动力黏度，N·s/m^2；g_i为i方向上的体积作用力，N/m^3；f_i为反方向阻力，N/m^3；P为表面力，N/m^2；S_i为i方向源项，N/m^3。

(3) 能量守恒方程。

流体能量方程：

$$\varepsilon(\rho c_j)\frac{\partial T_f}{\partial\tau}+(\rho c_f)u_f\cdot\nabla T_f=\varepsilon\nabla\cdot(\lambda_f\nabla T_f)+\varepsilon q_f+h_v(T_s-T_f) \quad (3)$$

式中：c_f为冷却风体积比热容，J/(kg·K)；u_f为冷却风表观速度，m/s；T_f为冷却风温度，K；λ_f为冷却风导热率，W/(m·K)；q_f为冷却风热源项，W/m^3；T_s为烧结矿温度，K；h_v为综合体积传热系数，W/(m^3·K)。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

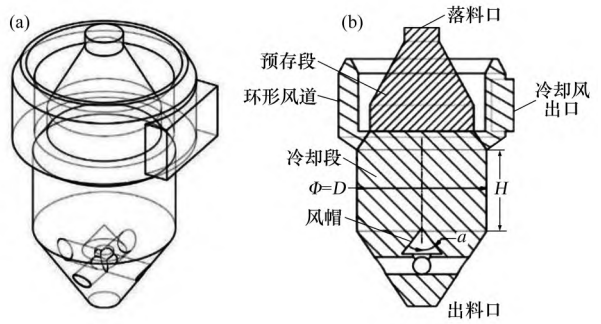
固体能量方程:

$$(1-\varepsilon)(\rho c_s)\frac{\partial T_s}{\partial \tau}=(1-\varepsilon)\nabla\cdot(\lambda_s\nabla T_s)+(1-\varepsilon)q_s-h_v(T_s-T_f) \quad (4)$$

式中: c_s 为矿料体积比热容，J/(kg·K)；ρ_s 为矿料密度，kg/m^3；q_s 为烧结矿热源项，W/m^3；λ_s 为矿料导热率，W/(m·K)。

1.2　几何模型

竖式烧结矿冷却炉装置中冷却风由供气装置送入十字形风道内，经过十字形风道后由风帽向炉内送风，在炉内换热完成后，高温气体从出口导入余热锅炉内进行发电。建立烧结炉物理模型，如图 1 所示。图中 H 为冷却段高度(m)，D 为冷却段直径(m)，α 为风帽倾斜角度(°)。



(a) 三维几何结构示意；(b) 剖面几何结构示意

图 1　竖式烧结矿冷却炉几何结构示意

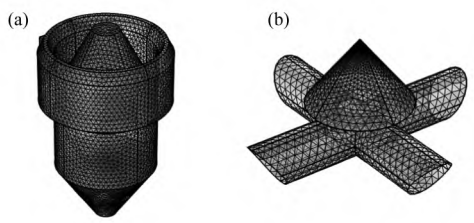
Fig. 1　Schematic diagram of geometric structure of vertical sinter cooling furnace

1.3　网格模型

目前，网格划分方式分为结构化网格、非结构化网格、结构化/非结构化混合网格 3 种。结构化网格是早期最常使用的网格划分方式，其特点是计算精度较高，但结构化网格仅适用于较简单规则的计算区域；非结构化网格适用于较复杂的模型计算区域，计算机的发展使其计算速度较低的缺点得以弥补。因此，基于 Fluent Meshing 软件选择非结构化网格对整体模型进行网格划分。整体网格尺寸应适中，在满足计算速度的同时，达到一定的计算精度。风帽部分由于锥体尖端部分易出现网格畸变，因此对风帽的局部网格进行加密。网格模型如图 2 所示。

1.4　边界条件

边界条件包括热变量和流动变量。由于炉内



(a) 整体网格模型；(b) 局部风帽网格模型

图 2　竖式烧结矿冷却装置网格模型

Fig. 2　Grid model diagram of vertical sinter cooling device

冷却风的流动属于不可压缩流动，边界条件设置: ① 忽略冷却风在输风管内的流动，风帽处锥体上表面设置为冷却风速度入口；② 冷却风出口为压力出口，出口处静压为 0；③ 烧结矿入口为流量入口，流量为 102 kg/s，底部为压力出口；④ 壁面为绝热壁面；⑤ 烧结矿仅存在于冷却炉炉体内部，看做多孔介质处理，并将多孔区域均质化处理，孔隙率设置为 0.4，粒径为 11.2 mm[19]。

2　竖式冷却炉气固传热影响因素

影响竖式冷却炉换热效果的参数，包括操作参数和结构参数，操作参数主要有气固比、进口风温，结构参数有冷却段高度、冷却段直径等。通过固定其他参数，改变单一参数进行模拟研究，参数设置见表 1。

表 1　竖式冷却炉换热效果模拟参数

Table 1　Numerical simulation parameter of vertical sinter cooling furnace on heat exchange effect

方案序号	气固比/(m^3·t^{-1})	进口风温/℃	冷却段高度/m	冷却段直径/m
1－1	800	40	7.0	11.25
1－2	900	40	7.0	11.25
1－3	1 000	40	7.0	11.25
1－4	1 100	40	7.0	11.25
1－5	1 200	40	7.0	11.25
2－1	1 000	20	7.0	11.25
2－2	1 000	30	7.0	11.25
2－3	1 000	40	7.0	11.25
2－4	1 000	50	7.0	11.25
2－5	1 000	60	7.0	11.25
3－1	1 000	40	6.0	11.25
3－2	1 000	40	6.5	11.25

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

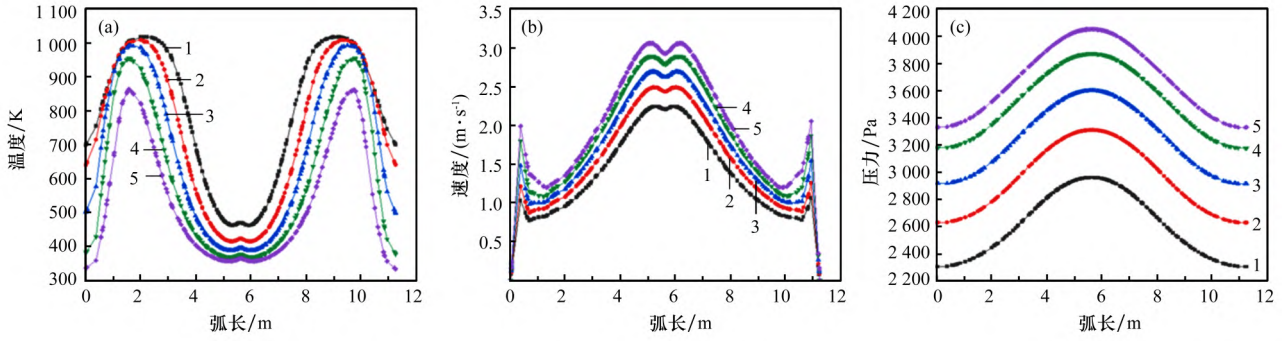
表 1(续)

方案序号	气固比/($m^3 \cdot t^{-1}$)	进口风温/℃	冷却段高度/m	冷却段直径/m
3 – 3	1 000	40	7.0	11.25
3 – 4	1 000	40	7.5	11.25
3 – 5	1 000	40	8.0	11.25
4 – 1	1000	40	7.0	10.25
4 – 2	1 000	40	7.0	10.75
4 – 3	1 000	40	7.0	11.25
4 – 4	1 000	40	7.0	11.75
4 – 5	1 000	40	7.0	12.25

为探究烧结矿竖式冷却炉气固逆流冷却换热规律，需对炉内不同位置的烧结矿温度、冷却风速度以及冷却风压力进行分析，同时为获得沿轴向不同高度截面上的参数变化规律，选 $z = 1$ 即风帽上方 1 m 处取 16 个横截面，对横截面取平均参数进行分析。

2.1 气固比对竖式冷却炉换热效果的影响

方案 1 – 1 ~ 1 – 5 为改变气固比，其他参数固定情况下的模拟工况。图 3、4 分别为冷却炉内不同气固比下沿径向与高度方向烧结矿温度、冷却风速度及压力分布。

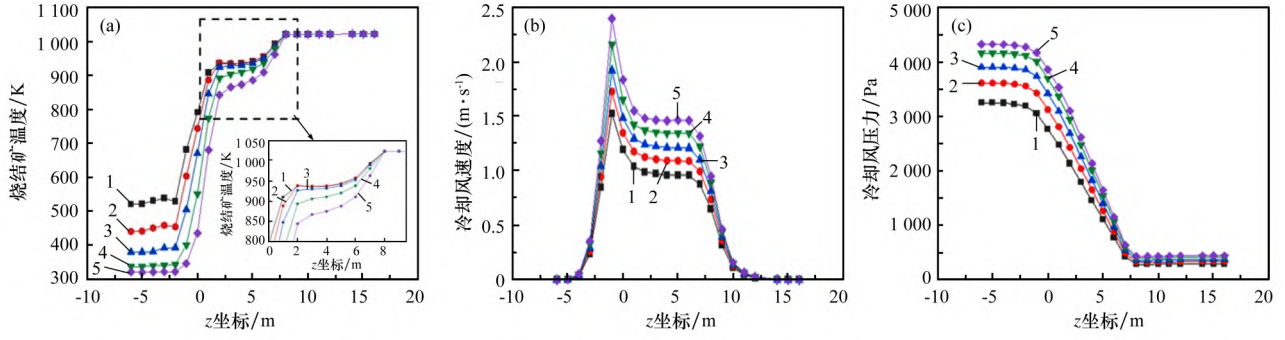


(a) 烧结矿温度；(b) 冷却风速度；(c) 冷却风压力

1—方案 1 – 1；2—方案 1 – 2；3—方案 1 – 3；4—方案 1 – 4；5—方案 1 – 5。

图 3 冷却炉内不同气固比下沿径向烧结矿温度、冷却风速度及压力分布

Fig. 3 Sinteing temperature, cooling velocity and cooling pressure distribution along the radial direction under different gas-solid ratios in cooling furnace



(a) 烧结矿温度；(b) 冷却风速度；(c) 冷却风压力

1—方案 1 – 1；2—方案 1 – 2；3—方案 1 – 3；4—方案 1 – 4；5—方案 1 – 5。

图 4 冷却炉内不同气固比下沿高度方向烧结矿温度、冷却风速度及压力分布

Fig. 4 Sinteing temperature, cooling velocity and cooling pressure distribution along height direction under different gas-solid ratio in cooling furnace

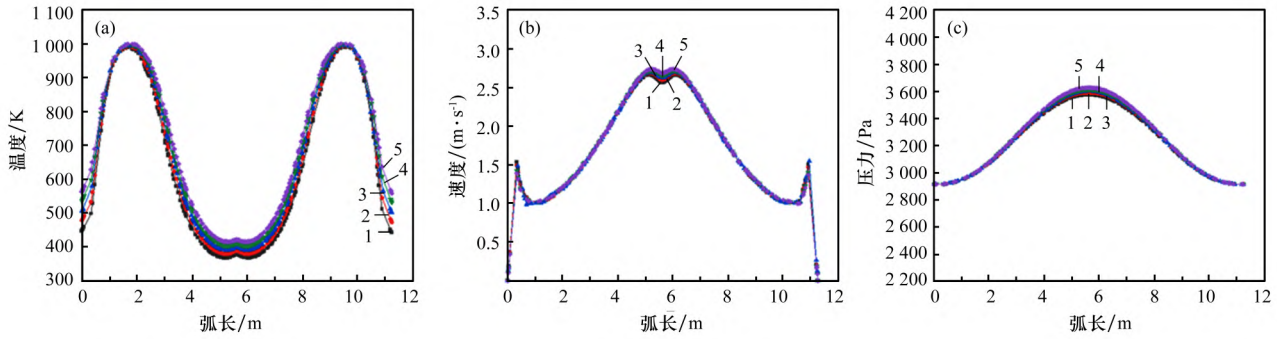
由图 3(a) 可以看出，炉内烧结矿温度沿径向整体呈 M 型分布；而图 3(b) 中冷却风速度分布与烧结矿温度分布趋势相反，呈现中间高，两边低的情况，壁面处先升高再接近滞止。这主要是风帽成锥形，中部气流速度最大，此部分冷却风与烧结矿热交换剧烈，而随着向外围速度逐渐降低，烧结矿冷却效果下降。同一截面的压力与速度趋势相似，沿炉中心呈对称分布，见图 3(c)。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由图 4 可知，随气固比增加，同一水平下烧结矿温度降低，冷却风速度增大，压力升高，炉内中心部分变化大于两侧，整体冷却段受气固比影响较大。随气固比增大，炉内换热效果明显加强，烧结矿出口温度减小，冷却风出口温度也减小，但冷却风压力增加，使料层阻力损失增大。

2.2　进口风温对竖式烧结矿冷却炉换热效果的影响

方案 2－1～2－5 为改变进口风温，其他参数固定情况下的模拟工况。图 5、6 分别为冷却炉内不同进口风温下沿径向与高度方向烧结矿温度、冷却风速度及压力分布。

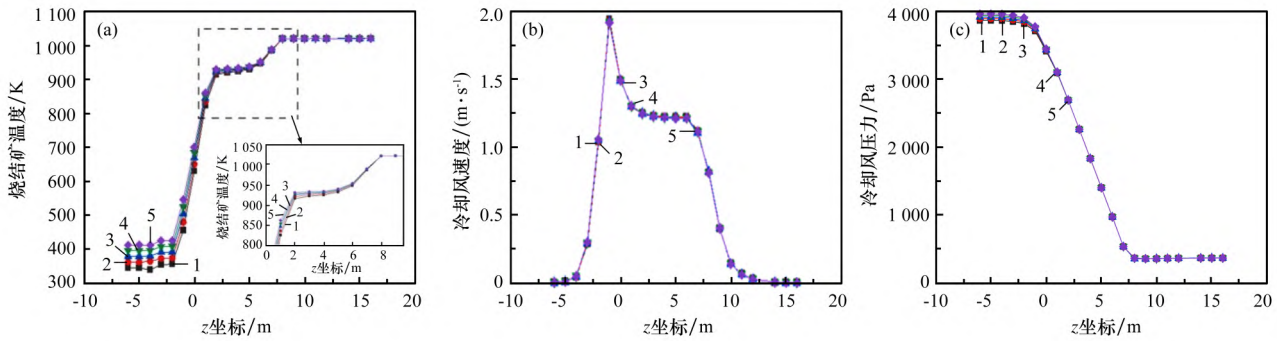


（a）烧结矿温度；（b）冷却风速度；（c）冷却风压力

1—方案 2－1；2—方案 2－2；3—方案 2－3；4—方案 2－4；5—方案 2－5。

图 5　冷却炉内不同进口风温下沿径向烧结矿温度、速度及压力分布

Fig. 5　Sinteing temperature，cooling velocity and cooling pressure distribution along the radial direction under different inlet air temperature in cooling furnace



（a）烧结矿温度；（b）冷却风速度；（c）冷却风压力

1—方案 2－1；2—方案 2－2；3—方案 2－3；4—方案 2－4；5—方案 2－5。

图 6　冷却炉内不同进口风温下沿高度方向烧结矿温度、速度及压力分布

Fig. 6　Sinteing temperature，cooling velocity and cooling pressure distribution along height direction under different inlet air temperature in cooling furnace

由图 5 可知，随冷却风进口风温的增大，烧结矿温度沿径向也呈“M”型分布，冷却风速度呈现中间高，两边低的情况，冷却风压力分布与速度分布相似。改变进口风温炉内各参数的变化与改变气固比变化相似，但进口风温对炉内换热影响较小，炉中心部分的温度受进口风温的影响较小，这与冯军胜的试验结果[7]相同，且各参数随进口风温的增大变化趋势很小。

由图 6 可知，增大进口风温，烧结矿的出口温度增大，冷却风速度增大，压力升高，炉内中心部分变化大于两侧，主冷却段受进口风温影响较大，轴向速度趋势基本无变化。炉内烧结矿矿料对空气的阻力特性不随温度发生变化，因此不同进口风温下的冷却风速度较为一致，接近重合。

2.3　冷却段高度对竖式烧结矿冷却炉换热效果的影响

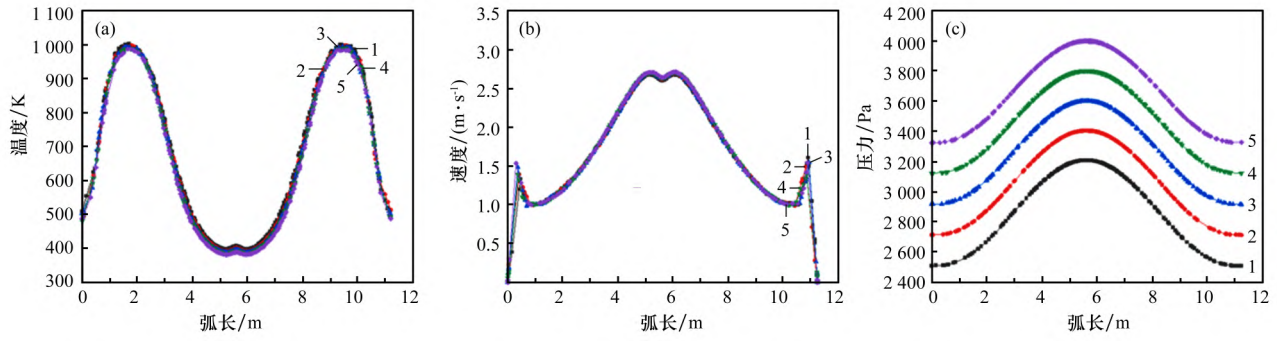
方案 3－1～3－5 为改变冷却段高度，其他参数固定情况下的模拟工况。图 7、8 分别为冷却炉

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

内不同冷却段高度下沿径向与高度方向烧结矿温度、冷却风速度及压力分布。

由图 7 可知，随冷却段高度的增大，烧结矿温度沿径向也呈“M”型分布，同一高度内冷却风速基本不受冷却段高度变化的影响，但冷却风压力变化较大。主要由于冷却段高度的增加，必然伴随料层总阻力的增大，导致冷却风压力损失增大。冷却段高度的影响结果和张福林的研究结果[20]一致。

由图 8 可知，增大冷却段高度，同一水平下烧结矿温度与冷却风速度基本无变化，但冷却风压力升高。在烧结矿矿料的空隙率与粒径不变的情况下，单位料层阻力基本不变，增大冷却段高度使料层高度增加，因此炉内压力下降速度基本不变，但下降长度变大，总压力损失增大。

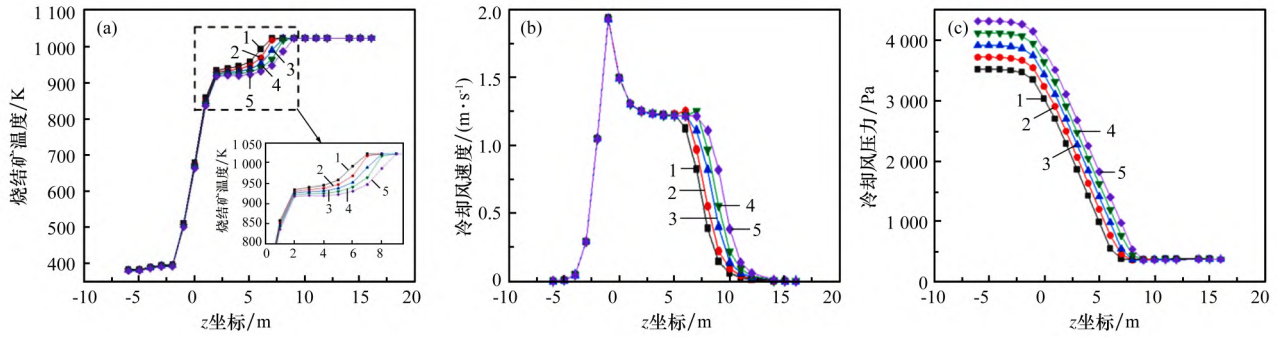


(a) 烧结矿温度；(b) 冷却风速；(c) 冷却风压

1—方案 3－1；2—方案 3－2；3—方案 3－3；4—方案 3－4；5—方案 3－5。

图 7 冷却炉内不同冷却段高度下沿径向烧结矿温度、冷却风速度及压力分布

Fig. 7 Sinteing temperature，cooling velocity and cooling pressure distribution along the radial direction under different height of cooling section in cooling furnace



(a) 烧结矿温度；(b) 冷却风速度；(c) 冷却风压力

1—方案 3－1；2—方案 3－2；3—方案 3－3；4—方案 3－4；5—方案 3－5。

图 8 冷却炉内不同冷却段高度下沿高度方向烧结矿温度、冷却风速度及压力分布

Fig. 8 Sinteing temperature，cooling velocity and cooling pressure distribution along height direction under different cooling section heights in cooling furnace

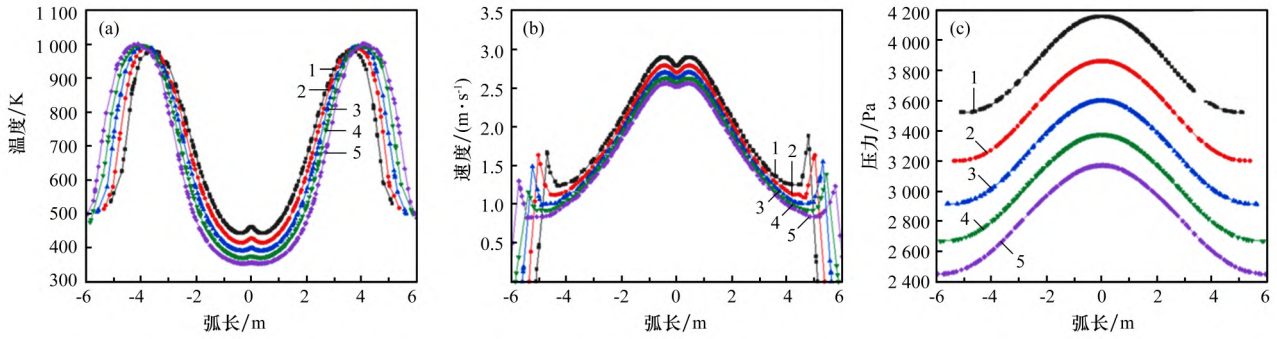
2.4 冷却段直径对竖式烧结矿冷却炉换热效果的影响

方案 4－1～4－5 为改变冷却段直径，其他参数固定情况下的模拟工况。图 9、10 分别为冷却炉内不同冷却段高度下与沿径向与高度方向烧结矿温度、冷却风速度及压力分布。

由图 9 可知，冷却段直径增大，烧结矿出口温度降低，冷却风速度与压力也降低，整体冷却加强，这和张福林的研究结果[20]基本一致。随冷却段直径的增大，在矿料流量不变的情况下，矿料速度减小，烧结矿在炉内时间增加，与冷却风的接触面积增大，换热效果更强。同时单位高度下的炉内体积增大，单位体积的冷却风速度必然减小，冷却风压力的变化与速度相似。

由图 10 知，增大冷却段直径，同一水平下烧结矿温度降低，冷却风速度与压力均降低，沿轴

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

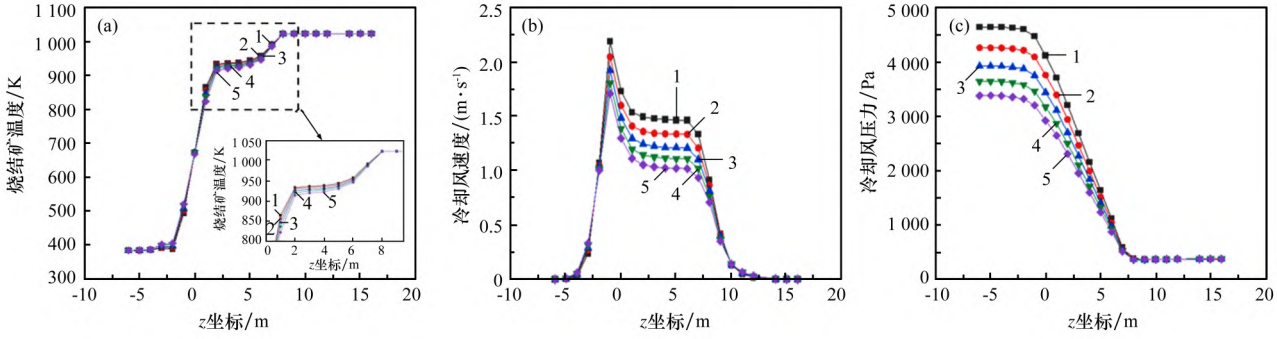


(a) 烧结矿温度；(b) 冷却风速度；(c) 冷却风压力

1—方案 4－1；2—方案 4－2；3—方案 4－3；4—方案 4－4；5—方案 4－5。

图 9　冷却炉内不同冷却段直径下沿径向烧结矿温度、冷却风速度及压力分布

Fig. 9　Sinteing temperature，cooling velocity and cooling pressure distribution along the radial direction under different diameter of cooling section in cooling furnace



(a) 烧结矿温度；(b) 冷却风速度；(c) 冷却风压

1—方案 4－1；2—方案 4－2；3—方案 4－3；4—方案 4－4；5—方案 4－5。

图 10　冷却炉内不同冷却段直径下沿高度方向烧结矿温度、冷却风速度及压力分布

Fig. 10　Sinteing temperature，cooling velocity and cooling pressure distribution along height direction under different cooling section diameters in cooling furnace

向温度变化较小，冷却风速度降低，料层阻力损失减小。轴向烧结矿温度减小，冷却风出口温度增大，同时冷却风的压力损失降低。

3　㶲效率模型及评价

3.1　㶲效率模型建立

㶲效率是热力学分析中㶲分析法主要指标，以热力学第二定律为基础，该方法在能量的“数”和“质”方面做出评价。当系统无化学反应和扩散时，封闭系统的㶲量计算:

$$de = c_p\left(1 - T_0/T\right)\mathrm{d}T + \left[v - \left(T - T_0\right)\left(\partial v/\mathrm{d}T\right)_p\right]\mathrm{d}p \tag{5}$$

式中：e 为系统内能的微小变化，J；c_p 为恒压比热容，J/(kg·K)；T_0 为参考温度，K；T 为温度，K；v 为系统的体积，m^3；$\left(\partial v/\mathrm{d}T\right)_p$ 为恒压条件下体积随温度的变化率；m^3/K。

式(5)中右侧第一项为温度㶲，第二项称压力㶲。分别进行积分可得:

$$E_{\mathrm{XT_i}} = m_i c_p\left(T_i - T_0\right)\left[1 - \frac{T_0}{T_i - T_0}\ln\frac{T_i}{T_0}\right] \tag{6}$$

式中：$E_{\mathrm{XT_i}}$ 为温度㶲，J；m_i 为物质质量，kg；T_i 为初始温度，K。

$$E_{\mathrm{XP_i}} = \frac{m_{\mathrm{f}}}{\mathrm{M}}RT_0\ln\frac{P_i}{P_0} \tag{7}$$

式中：m_{f} 为质量流量，kg/s；M 为气体摩尔质量，g/mol；R 为摩尔气体常数；P_i 为压力值，Pa；P_0 环境压力，Pa。

㶲量损失主要分为传热㶲损和压力㶲损:

$$E_{\mathrm{X_{loss,p}}} = E_{\mathrm{XP_1}} - E_{\mathrm{XP_2}} = \frac{q_{\mathrm{m,f}}}{\mathrm{M}}\mathrm{R}T_0\left(\ln\frac{P_1}{P_0} - \ln\frac{P_2}{P_0}\right) =$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\frac{q_{m,f}}{M}RT_0\ln\frac{P_1}{P_2} \tag{8}$$

式中：$E_{X_{loss,p}}$为烧结矿压力㶲损，J；E_{XP_1}、E_{XP_2}分别为初始和末态压力㶲损，J；$q_{m,f}$为质量流，kg/s；P_1、P_2分别为初始和末态压力，Pa。

$$E_{X_{loss,h}}=(E_{XT,S_{in}}-E_{XT,S_{out}})-(E_{XT,f_{in}}-E_{XT,f_{out}})-E_{X_{loss,p}} \tag{9}$$

式中：$E_{X_{loss,h}}$为烧结矿传热㶲损，J；$E_{XT,S_{in}}$、$E_{XT,S_{out}}$分别为入口和出口烧结矿温度㶲，J；$E_{XT,f_{in}}$、$E_{XT,f_{out}}$分别为入口和出口冷却风温度㶲，J。

通过系统的㶲值以及㶲损，就可以进行㶲效率的计算，㶲效率：

$$\eta_{E_X}=\frac{(E_{XT,f_{in}}-E_{XT,f_{out}})+(E_{XP,f_{in}}-E_{XP,f_{out}})}{E_{XT,S_{in}}-E_{XT,S_{out}})}=1-\frac{E_{X_{lost,p}}+E_{X_{lost,h}}}{E_{XT,S_{in}}-E_{XT,S_{out}}} \tag{10}$$

式中：η_{E_X}为㶲效率；$E_{XP,f_{in}}$，$E_{XP,f_{out}}$为冷却气体的进出口压力㶲，J；$E_{X_{loss,p}}$，$E_{X_{lost,h}}$为烧结矿冷却时的压力㶲损、传热㶲损，J。

3.2 㶲效率评价

为对单一参数变化下竖式烧结矿冷却炉的换热效果进行描述，根据建立的㶲效率评价模型对烧结矿冷却效果及冷却风所携带的能量进行评价，表2为不同方案下烧结矿及冷却风出口参数。

根据表2中的数据，结合已建立的㶲效率评价模型对数据进行计算，结果如图11所示。

结合表2与图11分析可知，增大气固比和提升冷却段高度时，冷却风携带㶲量与㶲效率变化趋势相反。提高进口风温和扩大冷却段直径时，冷却风携带㶲量与㶲效率变化趋势相同。以㶲效率为主要指标，不同参数变化下烧结矿竖式冷却炉内换热效果各不相同。随气固比增大，烧结矿的冷却效果加强，但冷却风所携带的热量的品质有所下降。冷却风在出口处所携带的㶲量随着气固比的增加而增大，同时㶲效率减小。随着进口风温的增大，冷却风出口温度增大，冷却风具有更高的㶲值，且㶲效率也增大。但同时增大进口风温会增大冷却风的压力损失。随着冷却段高度的增大，烧结矿㶲减小量以及冷却风㶲所携带的㶲值增大，㶲效率下降。随着冷却段直径的增大，烧结矿㶲减小量以及冷却风㶲所携带的㶲值也增大，㶲效率升高。

4 结 论

(1) 烧结矿竖式冷却炉内，同一高度下烧结矿温度沿径向均呈炉内中部温度较低，两侧温度较高，贴近壁面处温度再次降低的“M”型分布。同一水平下炉内冷却风压力沿径向均呈中间高两侧低的“驼峰”分布，冷却风速沿径向均呈中间高两侧低的“双驼峰”型分布。

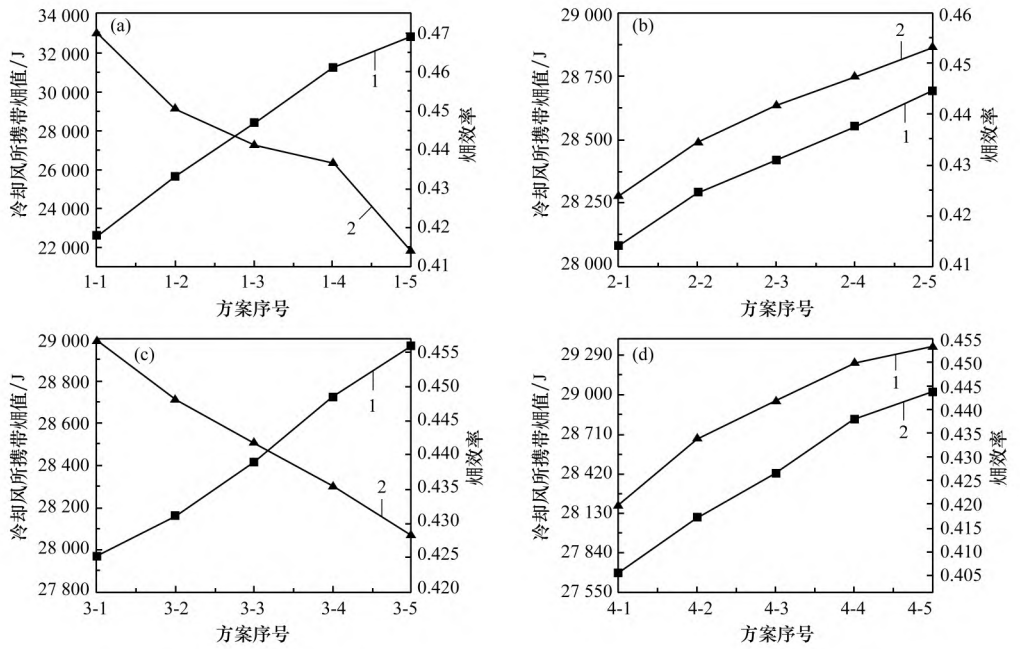
(2) 对于竖式冷却炉内高温烧结矿冷却过程，当增大气固比、提升冷却段高度、扩大冷却段直

表2 不同方案下烧结矿及冷却风出口参数

Table 2 Parameters of sinter and cooling air outlet under different schemes

方案	烧结矿出口温度/℃	冷却风出口温度/℃	冷却风压力损失/Pa	方案	烧结矿出口温度/℃	冷却风出口温度/℃	冷却风压力损失/Pa
1－1	239.140	645.11	2 341.82	3－1	106.85	625.82	2 481.20
1－2	162.820	644.36	2 641.94	3－2	105.85	629.61	2 687.00
1－3	105.510	634.74	2 888.29	3－3	105.51	634.74	2 888.29
1－4	64.495	604.13	3 104.93	3－4	103.82	640.84	3 094.15
1－5	49.432	540.59	3 222.93	3－5	102.89	645.55	3 296.31
2－1	71.740	628.10	2 870.50	4－1	108.31	620.06	3 520.67
2－2	88.260	632.25	2 881.58	4－2	106.35	628.25	3 185.71
2－3	105.510	634.74	2 888.29	4－3	105.51	634.74	2 888.29
2－4	121.210	637.36	2 897.56	4－4	105.07	642.70	2 633.81
2－5	137.570	640.19	2 905.17	4－5	104.75	646.70	2 404.41

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a) 增大气固比；(b) 提高进口风温；(c) 提升冷却段高度；(d) 扩大冷却段直径

1—冷却风所携带㶲值；2—㶲效率。

图 11　不同方案下竖式烧结矿冷却炉㶲效率变化趋势

Fig. 11　Changing trend of cooling furnace efficiency of vertical sinter under different schemes

径时，烧结矿的出口温度减小，冷却风出口温度也降低，烧结矿冷却效果增强；提高空气进口风温，烧结矿的出口温度增大，炉内换热效果降低。

(3) 对于竖式冷却炉内冷却气体流动过程，当增大气固比、提高进口风温、提升冷却段高度时，冷却风速度增大，压力升高，料层阻力损失增加；扩大冷却段直径，冷却风速度与压力均降低，料层阻力损失减小。

(4) 利用㶲效率模型对余热回收效果进行评价，当增大气固比、提升冷却段高度、扩大冷却段直径时，冷却风出口温度降低、所携带的热量的品质下降，出口气体㶲值增大，㶲效率减小；提高空气进口风温，冷却风所携带的㶲值增大，㶲效率增大。

参考文献:

[1] 董辉，李磊，刘文军，等. 烧结矿余热竖罐式回收利用工艺流程[J]. 中国冶金，2012，22(1)：6－11.
DONG Hui，LI Lei，LIU Wen Jun，et al. Process of waste heat recovery and utilization for sinter in vertical tank [J]. China Metallurgy，2012，22(1)：6－11.

[2] 董辉，赵勇，蔡九菊，等. 烧结－冷却系统漏风问题研究[J]. 钢铁，2012，47(1)：95－99.
DONG Hui，ZHAO Yong，CAI Jiuju，et al. Leakage of sintering-cooling system [J]. Iron and Steel，2012，47(1)：95－99.

[3] FENG Huijun，CHEN Lingen，LIU Xiong，et al. Constructal optimization of a sinter cooling process based on exergy output maximization [J]. Applied Thermal Engineering，2016，96(3)：161－166.

[4] 冯军胜，董辉，赵勇. 烧结矿余热回收竖罐内气体流动的数值计算[J]. 东北大学学报(自然科学版)，2015，36(5)：660－664.
FENG Junsheng，DONG Hui，ZHAO Yong. Numerical investigation of gas flow in vertical tank for recovering sinter waste heat [J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition，2015，36(5)：660－664.

[5] FENG Junsheng，DONG Hui，GAO Jianye，et al. Theoretical and experimental investigation on vertical tank technology for sinter waste heat recovery [J]. Journal of Central South University，2017，24(10)：2281－2287.

[6] 冯军胜，董辉，刘靖宇，等. 烧结矿余热回收竖罐内气固传热特性[J]. 化工学报，2015，66(11)：4418－4423.
FENG Junsheng，DONG Hui，LIU Jingyu，et al. Gas-solid heat transfer characteristics in vertical tank for sinter

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

waste heat recovery [J]. Journal of Chemical Engineering,2015,66(11):4418 – 4423.

[7] 冯军胜. 烧结矿余热回收竖罐内气固传热过程及其应用研究 [D]. 沈阳:东北大学,2017.
FENG Junsheng, Gas solid heat transfer process and application research in vertical tank for sinter waste heat recovery [D]. Shenyang: Northeastern University,2017.

[8] TIAN Wanyi,NI Bingyu,JIANG Chao,et al. Uncertainty analysis and optimization of sinter cooling process for waste heat recovery [J]. Applied Thermal Engineering,2019,150:111 – 120.

[9] TIAN Wanyi,JIANG Chao,NI Bingyu,et al. Global sensitivity analysis and multi-objective optimization design of temperature field of sinter cooler based on energy value [J]. Applied Thermal Engineering,2018,143:759 – 766.

[10] TIAN Fuyou,HUANG Lianfeng,FAN Liwu,et al. Wall effects on the pressure drop in packed beds of irregularly shaped sintered ore particles [J]. Powder Technology,2016,301:1284 – 1293.

[11] FAN X,YANG H,TINA W,et al. Catalytic oxidation of chlorobenzene over MnO_x/Al_2O_3-carbon nanotubes composites [J]. Catalysis Letter,2011,141(1):158 – 162.

[12] GUO Zehua, SUN Zhongning, ZHANG Nan, et al. Influence of confining wall on pressure drop and particle-to-fluid heat transfer in packed beds with small D/d ratios under high Reynolds number [J]. Chemical Engineering Science,2019,209:115200.

[13] GORMAN J M,ZHENG A,SPARROW E M. Bounding wall effects on fluid flow and pressure drop through packed beds of spheres [J]. Chemical Engineering Journal,2019,373:519 – 530.

[14] MAYERHOFER M, GOVAERTS J, PARMENTIER N, et al. Experimental investigation of pressure drop in packed beds of irregular shaped wood particles [J]. Powder Technology,2011,205(1):30 – 35.

[15] KOEKEMOER A,LUCKOS A. Effect of material type and particle size distribution on pressure drop in packed beds of large particles: Extending the Ergun equation [J]. Fuel,2015,158:232 – 238.

[16] PARK J H,LEE M,MORIYAMA K,et al. Adequacy of effective diameter in predicting pressure gradients of air flow through packed beds with particle size distribution [J]. Annals of Nuclear Energy,2018,112:769 – 778.

[17] SOMA J. Exergy transfer: a new field of energy endeavor [J]. Energy Engineering,1985,82(4):11 – 22.

[18] DUNBAR W R, LIOR N R, GAGGIOLI A. component equations of energy and exergy [J]. Journal of Energy Resources Technology,1992,114(1):75 – 83.

[19] 张四宗,温治,刘训良,等. 不规则烧结矿余热回收竖罐内气体阻力特性 [J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(6):1963 – 1973.
ZHANG Sizong, WEN Zhi, LIU Xunliang, et al. Gas resistance characteristics in vertical tank with irregular sinter for waste heat recovery [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(6):1963 – 1973.

[20] 张福林. 竖式逆流换热装置整体设计及数值分析 [D]. 马鞍山:安徽工业大学,2020.
ZHANG Fulin. The Overall design and numerical analysis of the vertical countercurrent heat exchanger [D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology,2020.

(上接第15页)

HE Xinhua,WEN Rongyao. A vertical sieving sintering cooler and sintering ore cooling method:201710512387.2 [P]. 2017 – 06 – 29.

[24] 弋治军,王雪原,郑宏,等. 一种烧结分级组合冷却及余热回收装置:202111496561.1 [P]. 2021 – 12 – 09.
YI Zhijun,WANG Xueyuan,ZHENG Hong,et al. A sintering classification combined cooling and waste heat recovery device:202111496561.1 [P]. 2021 – 12 – 09.

[25] 高静涛,白银川. 一种基于梁式结构的方形竖冷窑:202021953317.4 [P]. 2020 – 09 – 07.
GAO Jingtao,BAI Yinchuan. A square vertical cooling kiln based on beam structure:202021953317.4 [P]. 2020 – 09 – 07.

[26] 张志良. 多角多面多层360度送风烧结矿冷却塔:201718064576.6 [P]. 2017 – 09 – 22.
ZHANG Zhiliang. Multi angle, multi sided and multi-layer 360 degree air blast sintering ore cooling tower:201718064576.6 [P]. 2017 – 09 – 22.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net